

- Experimental Filtration Observations with a Watering Factor. Express Information. Hydrogeology and Engineering Geology. Domestic Production Experience]. Moscow, VIEMS Publ., 1986, vol. 2, pp. 1–8. (in Russian).
9. *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Special Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Ed. M. Abramowitz, I. Stegun. Moscow, Nauka Publ., 1979, 831 p. (in Russian).
 10. *Spravochnoye rukovodstvo gidrogeologa* [Reference Guide Hydrogeologist]. Ed. V.M. Maximov. Moscow, Nedra Publ., 1967, vol. 1, 592 p. (in Russian).
 11. Kharin O.N. [Derivation of Approximate Formulas Characterizing the Operation of an Enlarged Well with a Constant Flow Rate in the Conditions of an Elastic Mode]. *Trudy MING i GP imeni akad. I.M. Gubkina «Razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy i podzemnaya gidrodinamika»* [Proc. of the MING and GP named Acad. I.M. Gubkin «Development of Oil and Gas Fields and Underground Hydrodynamics»], 1964, Vol. 55, pp. 41–47. (in Russian).
 12. Shestakov V.M. Terminology Issues in Hydrogeodynamics. *Vodnyye resursy* — Water Resources, 1984, Vol. 8, No. 5, pp. 156–159. (in Russian).
 13. Schelkachev V.N. *Razrabotka neftevodonosnykh plastov pri uprugom rezhime* [Development of Oil Reservoirs in the Elastic Mode]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959, 467 p. (in Russian).
 14. Schelkachev V.N. Investigation of the Unsteady Filtration Flow of an Elastic Fluid to a Circular Battery of Sewers. *Doklady AN SSSR — Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1951, Vol. 79, no. 4, pp. 577–580. (in Russian).
 15. Schelkachev V.N. Refinement of the Approximate Formula for Determining the Pressure Drop on the Wall of an Enlarged Well, Fired with a Constant Flow Rate. *Trudy MING i GP imeni akad. I.M. Gubkina «Podzemnaya gidrodinamika»* [Proc. of the MING and GP named Acad. I.M. Gubkin «Underground Fluid Dynamics»], 1964, Vol. 33, pp. 5–13. (in Russian).
 16. Schelkachev V.N., Vlyushin V.E. Further Simplification of the Approximate Formula for Calculating the Pressure Drop on the Wall of an Enlarged Well Put Into Operation With a Constant Flow Rate in an Elastic Mode. *Izvestiya VUZov. Neft' i gaz — News of Universities. Oil and Gas*, 1963, no. 7, pp. 77–82. (in Russian).
 17. Ingersoll L.R., Adler F.T., Plass H.T., Ingersoll A.S. Theory of heat exchangers for the heat pump. *Journal of American Society of Heating and Ventilating*, 1950, vol. 22, no. 5, pp. 113–123.
 18. Van Everdingen A.F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Petroleum Transactions, AIME*, 1949, no. 12, pp. 305–324.
 19. Theis C.V. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage. *Transactions. American Geophysical Union*, 1935, vol. 16, pp. 519–524.

УДК 624.131.1

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ УГЛОВ ЗАЛОЖЕНИЯ ОТКОСОВ КАРЬЕРА С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНОГО МАССИВА (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА)*

Л.А. ЯРГ¹, И.К. ФОМЕНКО¹, О.М. ЖИТИНСКАЯ²

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

²Старооскольский филиал ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет»
14/13, Ленина ул., Старый Оскол 309530, Россия
e-mail: gonjarova_o@mail.ru

Разработка Стойленского железорудного месторождения открытым способом на протяжении 50 лет, сопровождающаяся извлечением огромных масс горных пород и руд, кардинально изменяет напряженно-деформационное состояние массива и формирование техногенного водоносного горизонта. Длительная эксплуатация карьера вызывает возникновение инженерно-геологических процессов: осыпей, обвалов, оползней, оплывин, суффозий. Развитие процессов, инициируемое технологическими работами, носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении. Решение вопросов устойчивости бортов карьера, обеспечивающих безаварийное ведение горнодобывающих работ при длительной разработке месторождения, базируется на современной методологии расчёта. Предлагается алгоритм оптимизации углов заложения откосов Стойленского карьера и расчёт коэффициента устойчивости различными методами с учётом трещиноватости скального массива на основе использования критерия анизотропии прочности пород.

Ключевые слова: природно-техническая система; месторождение; карьер; откос; процессы; анизотропия; трещиноватость; устойчивость; модель.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-67-77

THE ANGLES OPTIMIZATION ALGORITHM OF SLOPES LAYING ON IRON ORE OPEN CAST MINE CONSIDERING ANISOTROPY OF STRENGTH PROPERTIES AND FRACTURE DENSITY OF THE SOLID ROCK (on the example of Stoylensky iron ore open cast mine at Kursk Magnetic Anomaly)

L.A. YARG¹, I.K. FOMENKO¹, O.M. ZHITINSKAYA²

¹*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia*

²*Starooskolsky branch of the Russian State Geological Prospecting University
14/13 Lenina st., the city of Stary Oskol 309514, Belgorod region, Russia
e-mail: gonjarova_o@mail.ru*

The development of Stoylensky iron ore opencast mine during the 50 years is accompanied by the extraction of huge masses of rocks and ores, that radically changes the stress-strain state of the array and the formation of a technogenic aquifer. The long-term quarry exploitation has a result of progressive development of engineering-geological processes: scree, landslides, creeps, suffusion. The development of processes initiated by technological works has a progressive space-time character. The solution of problem of the open pit slope stability which provides accident-free conducting of mining operations at long-term development of the field, is based on modern methodology of calculations. The angles optimization algorithm of slopes staking on Stoylensky iron ore open cast mine and the calculation of the coefficient of stability by different methods with the consideration of the anisotropy of strength properties and fracture density of the solid rock, have been suggested.

Key words: natural-technological system; field; quarry; slopes; processes; anisotropy; model; stability; fracture density; properties.

Стойленское месторождение КМА разрабатывается с 1969 г. открытым способом. Размеры карьера (по дневной поверхности) составляют около 2,3×2,5 км. Сегодня глубина Стойленского карьера достигла 350 м, проектная глубина — 475 м. Длительная эксплуатация ПТС «Стойленский ГОК» (50 лет) привела к изменению компонентов природной среды [2].

Одним из основных факторов при оптимизации системы риск—экономическая эффективность является согласование параметров разработки МПИ с его инженерно-геологическими условиями, главным образом, это связано с оценкой устойчивости бортов карьеров.

Цель работы: обеспечение устойчивости откосов глубокого заложения в сложных инженерно-геологических условиях.

Задачи исследования:

1. Установление тенденций изменения компонентов инженерно-геологических условий при длительном функционировании природно-технической системы (ПТС) МПИ.

2. Обоснование параметров и геомеханических моделей расчёта устойчивости бортов карьера с учётом основных причин и условий, определяющих развитие процессов и обуславливающих перманентного изменения состояния горного массива.

3. Расчёты устойчивости борта карьера и оценка различных факторов (блочность массива, прочность породы в массиве) на полученные результаты.

Геологическое строение. В геолого-структурном отношении Курская магнитная аномалия находится в сводовой части Воронежской антеклизы — крупной положительной структуры Русской платфор-

мы и приурочен к юго-западному склону Воронежского кристаллического массива и северо-восточной окраине Днепровско-Донецкой впадины [1].

Месторождения Лебединское и Стойленское расположены в центральной части северо-восточной полосы КМА. В геологическом строении месторождений принимают участие два структурных комплекса: нижний — кристаллический фундамент, представленный сложнодислоцированными метаморфизованными кристаллическими породами докембрия, и верхний — осадочный чехол, трансгрессивно перекрывающий кристаллические породы и сложенный горизонтально залегающими отложениями палеозоя, мезозоя и кайнозоя [6].

Фундамент представлен комплексом метаморфических пород докембрия: железорудной коробковской и подстилающей её стойленской свитой (мощностью 159—500 м), представленной кварцито-песчаниками с прослоями сланцев. Основные типы руд — магнетитовые 43% и силикатно-магнетитовые 34%. Минеральный состав неокисленных кварцитов, %: магнетит 37,7, гематит 31, силикаты 25, сидерит 3, пирит 0,2, кварц 29. Физико-механические свойства: плотность 3,44 г/см³, пористость 4%, влажность 3%, коэффициент крепости по шкале Протодьяконова 12—16 [1].

Рельеф докембрийского массива отличается большей сложностью. Сбросы, возникшие в процессе образования Днепровско-Донецкой впадины, обусловили наличие уступов и глубоких ложбин. В результате тектонических движений породы протерозойского комплекса смяты в сложную систему антиклинальных и синклиналиных скла-

док преимущественно северо-западного простирания с крутым (60—90°) падением крыльев. Интенсивная складчатость докембрийских образований обусловила крутое, нередко вертикальное залегание рудных пластов.

Сложноскладчатый рудно-кристаллический фундамент разбит крупными тектоническими нарушениями различного порядка. Западный региональный разлом и тектонические нарушения I и II порядка протяженностью от 1000 до нескольких сотен метров. Разрывные нарушения крутопадающие (65—85°). Зоны тектонических нарушений, представляющие собой зоны дробления, расщепления с глиной трения, сопровождаются зонами повышенной трещиноватости. Расстояния между зонами нарушений колеблется от 30 до 150 м. Системы трещин и разломов расчленяют рудно-кристаллический массив на блоки. По степени структурной нарушенности массив характеризуется как крупно—среднеблочный, кора выветривания — как мелкоблочная [6]. Широкое распространение имеют межпластовые и секущие дайки, а также жилы диорит-порфиринов и гранитов, мощностью 10—20 см.

Докембрийский кристаллический массив трансгрессивно перекрыт осадочным чехлом: четвертичными песчано-глинистыми отложениями, мергельно-меловой формацией турон-коньяк-сантонского яруса, плотными неоднородными по гранулометрическому составу песками альб-сеноманского яруса, юрско-неокомскими песчано-алевритистыми и глинистыми отложениями девона. Мощность осадочного чехла 150—180 м [1].

Наличие четырёх водоносных горизонтов: рудно-кристаллического, альб-сеноманского, турон-коньякского, четвертичного определяет сложность условий разрабатываемых месторождений. Осушение Лебединского и Стойленского карьеров осуществляется комбинированным способом с применением подземного дренажного комплекса, перехватывающего основную часть потока подземных вод за пределами штреков на альб-сеноманский и лучевые скважины на рудно-кристаллический водоносные горизонты, и внутрикарьерного дренажного комплекса: дренажные каналы, горизонтальные дренажные скважины [12]. Суммарный водоприток по контуру карьера достигает 7000 м³/с и меняется по контуру карьера, вследствие неравномерной трещиноватости мергельно-меловой толщи.

Работа дренажной сети привела к образованию депрессионной воронки, диаметром 11 км и глубиной 40 м [12]. Понижение напоров подземных вод на больших площадях и многократное увеличение мощности зоны аэрации, появление новых областей питания и разгрузки водоносных пластов; увеличение степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод обуславливают форми-

рование техногенного режима подземных вод. Изменение гидрогеологических условий в процессе добычи руд (возникновение градиентов напора и резкое возрастание скоростей фильтрации; изменение интенсивности инфильтрационного питания подземных вод; усиление взаимосвязи между водоносными горизонтами посредством перетекания) перманентно провоцируют возникновение горно-геологических процессов в бортах карьера.

В прибортовых участках пород с изменённым напряжённым состоянием развиваются инженерно-геологические процессы: осыпание, обрушение, оползание, поверхностная эрозия, механическая, химическая суффозия: фильтрационные деформации. Одним из наиболее важных вопросов разработки МПИ открытым способом является оценка устойчивости бортов карьера. Выбор оптимальных параметров заоткоски уступов и выбор генерального угла наклона борта карьера оказывают влияние на технико-экономические показатели отработки месторождения и безопасность горных работ.

Борта карьера месторождений на *конечных контурах* формируются в толще пород осадочного чехла и пород рудно-кристаллического фундамента. Карьерное поле характеризуют следующие параметры: суммарная длина фронта карьера, рельеф поверхности карьера, уступы: их число, высота и угол заложения, бермы, отвалы.

Методика исследований. Оптимизация функционирования ПТС МПИ базируется на современной методологии расчётов бортов карьера и включает: 1) *выделение инженерно-геологических комплексов* (ИГК), различающихся горно-геологическими условиями и механизмом формирования процессов; 2) *инженерно-геологическую типизацию* бортов карьера с учётом состава и свойств горных пород, динамики техногенного водоносного горизонта; 3) *выбор расчётных параметров* для численного прогнозирования состояния откосов карьера; 4) *обоснование геомеханических моделей* расчёта устойчивости бортов карьера с учётом основных причин и условий, определяющих механизм развития процессов; 5) *реализацию геомеханических моделей* путем компьютерного моделирования.

Закономерности изменчивости компонентов инженерно-геологических условий являются основанием для установления предельных значений параметров ПТС «Стойленское месторождение», при котором длительно функционирующая система не выходит за пределы (границы) области допустимых состояний. Это предусматривает оценку коэффициента устойчивости (K_u) бортов карьера при техногенном изменении состояния и прочностных свойств пород, слагающих борта, в процессе извлечения полезного ископаемого (разработки карьера).

С точки зрения структуры локальной ПТС «Карьер» борта карьера на конечных контурах формируются в толще пород осадочного чехла и рудно-кристаллического фундамента.

Авторами оценена устойчивость бортов карьера, сформированных в толще рудно-кристаллических пород.

Обоснование геомеханических моделей расчёта устойчивости бортов карьера. Для толщи рудно-кристаллических пород, сложенной скальными породами мощностью до 600 м параметрами, необходимыми для расчёта, являлись следующие: плотность ρ , г/см³; сцепление C , МПа; угол внутреннего трения φ° ; с учётом анизотропии пород в массиве; трещиноватость и ориентировка по отношению к бортам карьера; блочность массива; также при расчетах методом конечных элементов — деформационные характеристики — модуль упругости E , МПа и коэффициент Пуассона μ .

Разрывные нарушения, являющиеся продольными относительно складчатости, расчленяют рудно-кристаллическую толщу на блоки пластинчатой и клиновидной форм, шириной 200—460 м. Падение разрывных нарушений крутое до субвертикального (70—90°). Разрывные нарушения представляют собой зоны дробления и расщепления с глиной трения; их мощность от 0,5 до 5—7 м.

В массиве докембрия прослеживаются следующие системы трещин [6]: напластования по слоистости (полосчатости) северо-восточного и юго-западного падения, азимут падения 310—320°, угол падения 60—85°, среднее расстояние между трещинами 0,7 м; продольной относительно складчатости субпараллельные простиранию пород, угол падения 10—30°, среднее расстояние между трещинами 0,85 м; поперечной относительно складчатости субортогональные простиранию трещин напластования, система трещин крутопадающая 60—85°, среднее расстояние между трещинами 1,0 м; крутопадающие разрывные нарушения не являются потенциальными поверхностями скольжения, а деформации уступов могут происходить по неблагоприятно ориентированным системам трещин.

Анизотропия свойств прочностных свойств пород массива обусловлена наличием «зон ослабления» — дробления и расщепления, брекчирования, дизъюнктивных нарушений с глиной трения. Поэтому точечные испытания не моделируют поведение массива горных пород в целом, т. е. результаты лабораторных испытаний образцов керна пород не характеризуют прочность и упругость горного массива. Влияние трещиноватости, слоистости и других структурных особенностей приводит к тому, что прочность и модуль упругости могут на порядок быть меньше соответствующих величин. Для перехода от свойств образца к свойству пород в массиве используют коэффициенты структурного ослабления. При количественной оценке

трещиноватости используют ряд параметров: модуль трещиноватости (M_t), модуль кусковатости (M_k), показатель нарушенности пород (RQD), коэффициент зон дробления ($K_{з.д.}$). В зарубежной практике при расчётах устойчивости скальных склонов и уступов для уточнения расчетных прочностных параметров широко применяются критерии прочности Хоека-Брауна и Бартон-Бандиса [15, 20].

В данном исследовании для скальных грунтов была использована анизотропная модель прочности, включающая три направления с различными прочностными свойствами:

скальных грунтов массива в продольном направлении относительно складчатости, субпараллельно простиранию трещинам с углами падения 10—30°;

скальных грунтов в поперечном направлении относительно складчатости направлении, субортогонально простиранию трещин напластования, система трещин крутопадающая 60—85°;

скальных грунтов в массиве (приняты для сильно трещиноватых пород).

Оптимизация функционирования ПТС МПИ базируется на современной методологии расчёта устойчивости бортов карьера [7, 13, 14, 24].

В горной геомеханике широкое применение нашли варианты расчётов по методам предельного равновесия, конечных элементов и объёмных скальных блоков, позволяющие оценить устойчивость с учётом существующих плоскостей раздела (трещиноватости) [4, 18].

Выбор местоположения и направления расчётных профилей производился исходя из принципа наибольшей опасности (вероятности обрушения борта карьера). «Чаша» карьера может быть условно разделена на зоны условной стабильности и потенциальной нестабильности бортов [11, 21].

Для потенциально нестабильных бортов карьера задача устойчивости может быть решена в плоской постановке при условии, что азимут падения трещин совпадает с азимутом падения борта карьера. Расчёты были выполнены в плоской постановке задачи методами предельного равновесия и конечных элементов [11, 21].

Применение методов предельного равновесия при оценке устойчивости скальных откосов. Для учёта существующих плоскостей раздела (трещиноватости) при оценке устойчивости бортов карьера методами предельного равновесия может быть применён подход с учётом следующих дополнительных положений:

1. Расчёт производится по оптимизированной блоковой поверхности скольжения, которая моделирует направление имеющихся в массиве поверхностей раздела.

2. Задание прочностных характеристик скальных грунтов производится на основе модели анизотропной прочности [3].

Моделирование устойчивости борта карьера, сформированном в толще рудно-кристаллического комплекса пород с использованием методов предельного равновесия выполнено по следующей схеме: в расчёте принят диапазон субгоризонтальных трещин от 10 до 30°, субвертикальных от 60 до 85°. Диаграмма прочностных свойств массива скальных грунтов с учётом их анизотропии, использованная при расчете методами предельного равновесия, приведена на рис. 1.

Результаты расчёта устойчивости борта карьера, приведены на рис. 2.

Результаты расчёта показывают, что коэффициент устойчивости (K_u) борта будет уменьшаться при увеличении угла падения субгоризонтальных трещин (в замеренном диапазоне падений от 10 до 30°) и уменьшении — субвертикальных (в замеренном диапазоне падений от 85 до 60°). Наиболее неблагоприятным является следующее сочетание трещин: субгоризонтальные трещины падают в карьер под углом 30°, субвертикальные — 60°. При этих значениях углов падения систем трещин борт карьера находится в состоянии близком к предельному равновесию (по методам расчета Моргенштерн-Прайса и Бишопа [16, 23]), по методу Янбу [22] — неустойчив.

Применение метода конечных элементов при оценке устойчивости скальных откосов с учётом трещиноватости массива. Метод конечных элементов (МКЭ) наряду с методами конечных разностей является

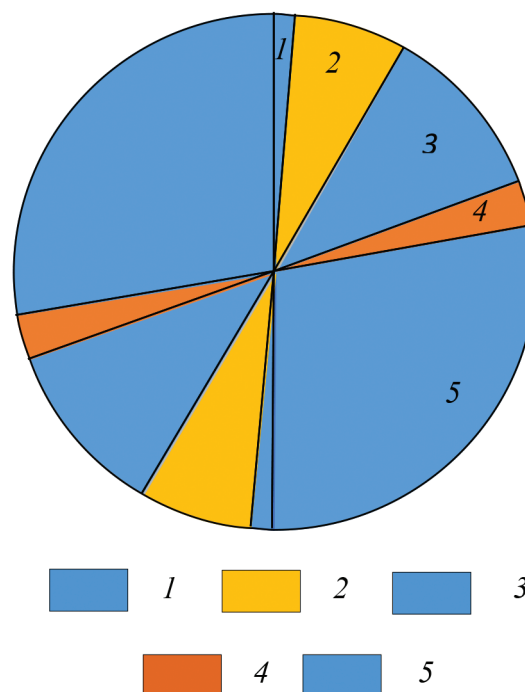


Рис. 1. Диаграмма анизотропии прочностных свойств массива скальных грунтов: 1 — от 90 до 85°; C 690 кПа, ϕ 32°; 2 — от 85 до 60°; C 730 кПа, ϕ 28°; 3 — от 60 до 20°; C 690 кПа, ϕ 32°; 4 — от 20 до 10°; C 510 кПа, ϕ 29°; 5 — от 10 до -90°; C 690 кПа, ϕ 32°

одним из основных численных методов решения задач по оценке устойчивости склонов и откосов в рамках механики сплошной среды [10, 17].

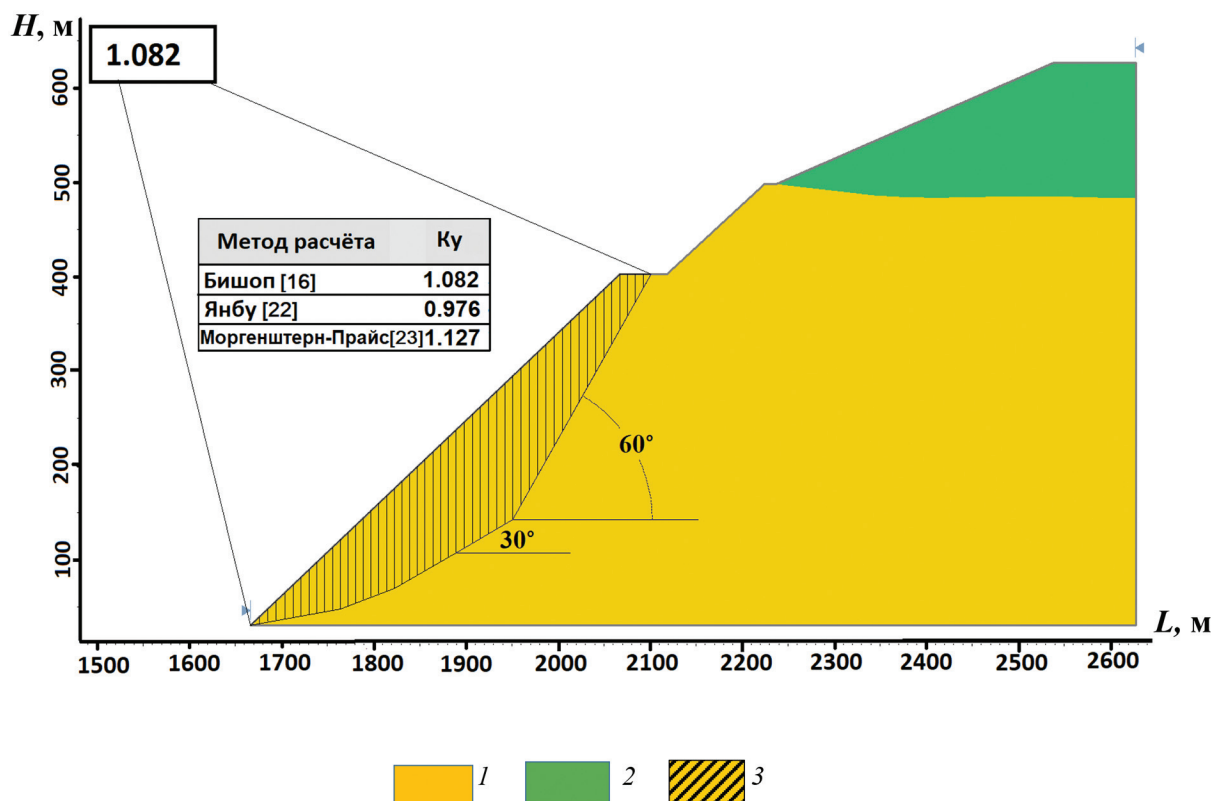


Рис. 2. Модель расчёта устойчивости борта карьера методом предельного равновесия (вариант I): 1 — породы вскрыши, 2 — породы рудно-кристаллического фундамента, 3 — блок смещения пород

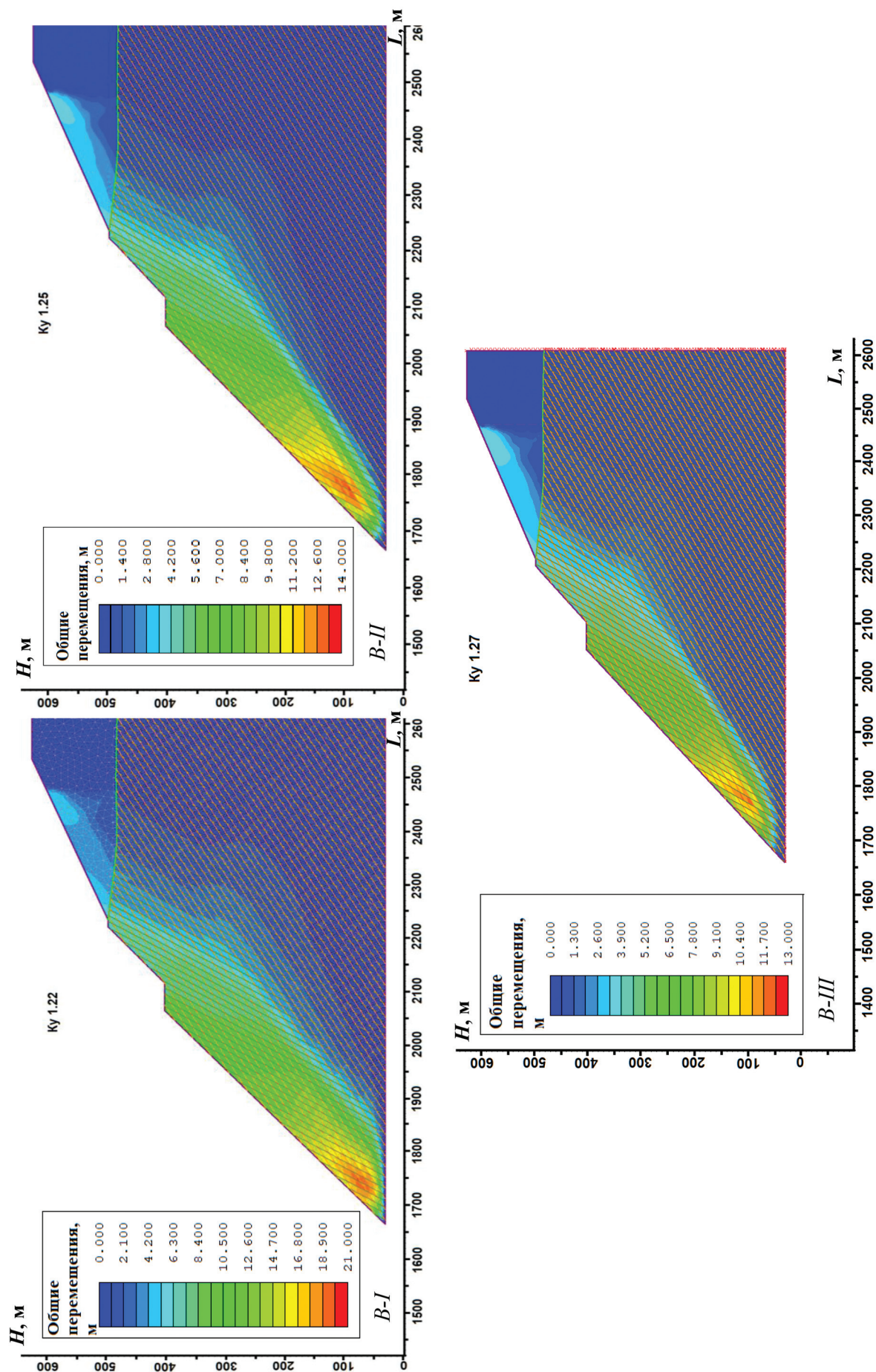


Рис. 3. Варианты расчёта устойчивости борта карьера методом конечных элементов с целью оценки влияния прочности скальных грунтов на коэффициент устойчивости: B-I – массив сложен сильнотрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 690, кПа; ϕ 32°; B-II – массив сложен среднетрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 1130, кПа; ϕ 36°; B-III – массив сложен слаботрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 3140, кПа; ϕ 39°

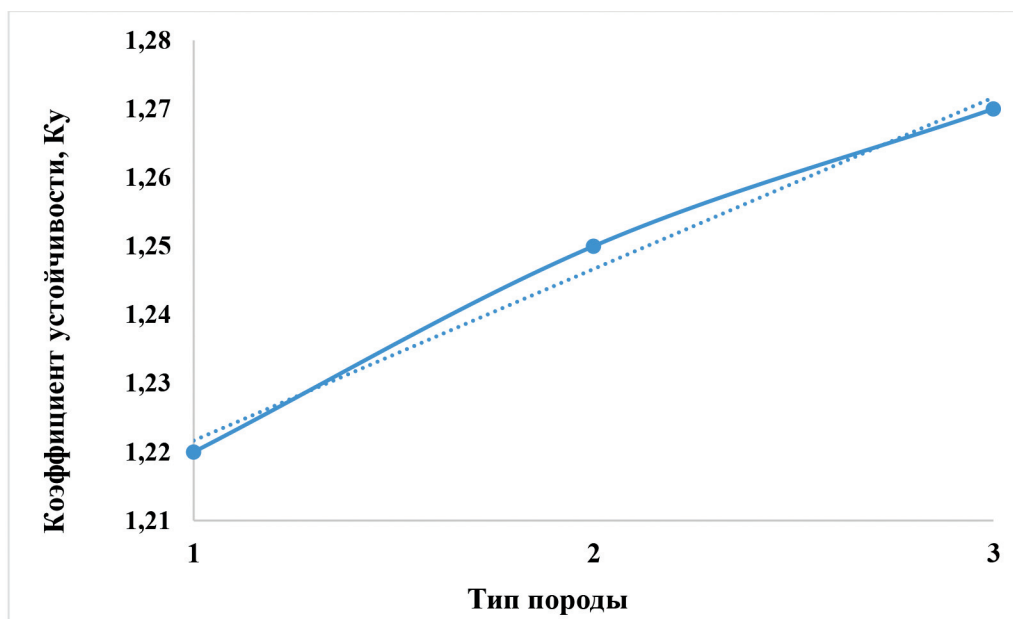


Рис. 4. Влияние прочности рудно-кристаллических пород в массиве на K_u : 1 — сильнотрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 690, кПа; ϕ 32°; 2 — среднетрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 1130, кПа; ϕ 36°; 3 — слаботрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 3140, кПа; ϕ 39°

В МКЭ структурные неоднородности в массиве горных пород, как имитация структуры первичной или вторичной трещиноватости, могут быть смоделированы с использованием особого механизма совместных границ [19]. Последние могут быть заданы для различных статистических или детерминистических моделей и моделируются как зоны, где происходит скачок смещений частей конечно-элементной сетки. Рассматриваемые зоны могут быть представлены как пружины, обладающие нормальной и сдвиговой жёсткостью. Такая формулировка совместных границ позволяет общим узлам конечно-элементной сетки перемещаться один относительно другого, создавая нормальные и касательные деформации. Эта идея берёт свое начало в концепции, заложенной в методе граничных элементов [5].

С использованием механизма совмещенных границ МКЭ оценено влияние на устойчивость борта карьера таких факторов, как прочность пород и блочность скального массива.

Влияние прочности пород в массиве на K_u . Одним из наиболее существенных инженерно-геологических факторов, определяющих устойчивость бортов карьеров в скальных грунтах, принято считать их прочность [8, 9].

С целью оценки значимости данного фактора, методом конечных элементов были выполнены расчёты по следующим вариантам: I — сильнотрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 690 кПа, ϕ 32°; II — среднетрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 1130 кПа, ϕ 36°; III — слаботрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 3140 кПа, ϕ 39°. Расстояние меж-

ду трещинами условно принято постоянным и равным 10 м (рис. 3).

На рис. 4. расположен график зависимости K_u от прочностных свойств скальных грунтов. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением прочности грунтов в массиве K_u закономерно возрастает по зависимости, близкой к линейной. Однако расчёты показывают, влияние данного фактора на устойчивость борта карьера незначительно. Увеличение сцепления более чем в 4,5 раза привело к росту K_u на 0,05. Это доказывает, что устойчивость борта карьера в данном случае определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

Влияние блочности на K_u борта карьера. Существенным инженерно-геологическим фактором, определяющим устойчивость бортов карьеров в скальных грунтах также принято считать блочность массива скальных грунтов.

С целью оценки значимости блочности массива на устойчивость бортов карьера методом конечных элементов были выполнены расчёты по следующим вариантам: I — расстояние между трещинами 10 м (данный вариант расчёта соответствует первому варианту, описанному выше); II — 20 м; III — 7,5 м; IV — 5 м; V — 2,5 м. (рис. 5).

На рис. 6. приведён график зависимости K_u от блочности массива скальных грунтов. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением расстояния между трещинами в массиве K_u закономерно растёт по зависимости близкой к логарифмической. Однако расчёты показывают, что влияние данного фактора на устой-

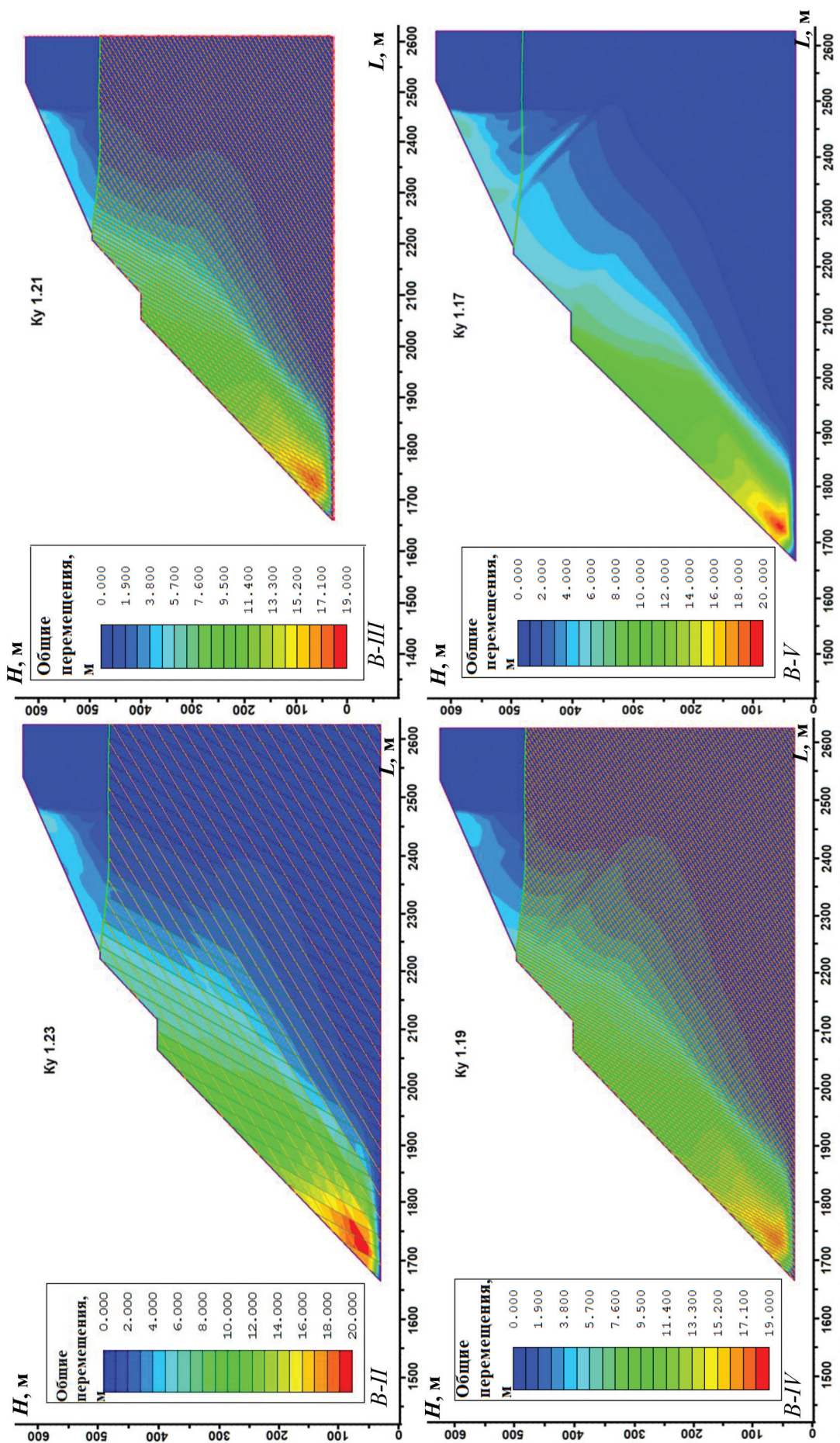


Рис. 5. Варианты расчёта устойчивости борта карьера методом конечных элементов с целью оценки влияния блочности массива скальных грунтов на коэффициент устойчивости, рас-
стояние между трещинами условно принято: B-II – 20 м; B-III – 7,5 м; B-IV – 5 м; B-V – 2,5 м

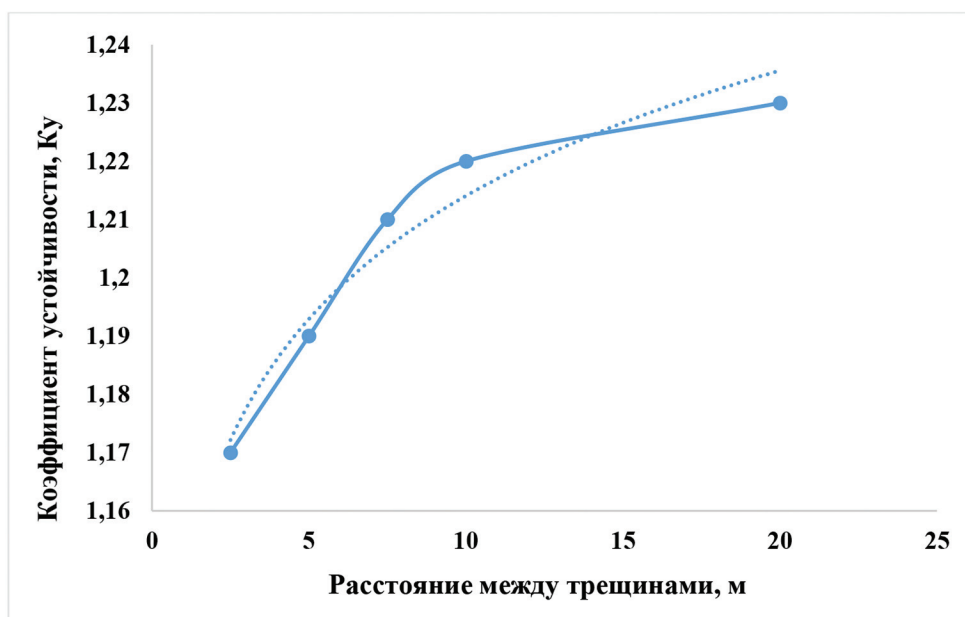


Рис. 6. Зависимость K_u от блочности массива скальных грунтов

чивость борта карьера также незначительно. Уменьшение расстояния между трещинами в восемь раз приводит к увеличению K_u на 0,06. Это также доказывает, что устойчивость борта карьера в данном случае определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

Выводы

1. Развитие процессов, инициируемое технологическими работами, носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении: буровзрывные работы, перманентное углубление карьера и работа дренажных установок приводят к изменению напряженного состояния, разуплотнению пород, увеличению размеров депрессионной воронки, активизации инженерно-геологических процессов. Поэтому актуальность проблемы обеспечения устойчивости массива пород в динамике развития горных работ очевидна. Основным фактором, влияющим на устойчивость борта карьера, является анизотропия прочности пород массива.

2. Оценка устойчивости бортов карьера на конечных контурах выполнена с использованием современных технологий (компьютерных программ) методами предельного равновесия: Моргенштер-

на-Прайс, Бишопа, Янбу и методом конечных разностей. Расчёты устойчивости выполнены в программном комплексе Rocscience: методами предельного равновесия — в Rocscience Slide 7, методом конечных элементов — в Rocscience RS 2.

3. Дальнейшая разработка карьера (проектная мощность 450 м) требует контроля и прогноза состояния приоткосных массивов.

4. Прогнозные оценки устойчивости бортов карьера должны выполняться с учётом изменения компонентов инженерно-геологических условий под влиянием техногенных взаимодействий производственного процесса и корректироваться с учётом их влияния на коэффициент устойчивости.

5. Устойчивость борта карьера в пределах руднокристаллического фундамента определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

6. В настоящее время борт карьера с неблагоприятной ориентацией систем трещин: (субгоризонтальные трещины падают в карьер под углом 30° , субвертикальные — 60°), находится в состоянии близком к предельному равновесию и при дальнейшей разработке карьера на нынешних уровнях эффективности приведет к возрастанию рисков его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железные руды КМА: монография / под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. 616 с.
2. Житинская О.М., Ярг Л.А. Изменение компонентов природной среды при длительной разработке месторождений открытым способом (на примере КМА) // Известия высших учебных заведений. Научно-методический журнал. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 49–61.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.
4. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инженерная геология. 2016. № 4. С. 4–21.
5. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела: пер. с англ. М. А. Тлеужанова / Под ред. А.М. Линькова. М.: Мир, 1987. 328 с.

6. Определение оптимальных параметров бортов карьера и отвалов ОАО «Стойленский ГОК» при развитии горных работ с увеличением добычи сырой руды до 42 млн. тонн в год: Отчет о НИР/ФГУП ВИОГЕМ / Рук. Киянец А.В., исп. Будков В.П., Григорьева С.Н., Кабанов Н.Н. [и др.]. Белгород, 2007. 55 с.
7. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: Изд-во РФ «Ленанд», 2015. 320 с.
8. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб.: ВНИМИ, 1998. 208 с.
9. Пустовойтова Т.К., Кагермазова С.В. Инженерно-геологическое обеспечение прогноза устойчивости бортов карьеров // Маркшейдерское дело в социалистических странах. Т. 2. Л.: ВНИМИ, 1988. С. 250–256.
10. Фоменко И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами. Дис... канд. геол. мин. наук. М., 2001. 138 с.
11. Фоменко И.К., Пендин В.В., Горобцов Д.Н. Оценка устойчивости бортов карьеров в скальных грунтах // Горные науки и технологии. 2016. № 3. С. 10–21.
12. Ярг Л.А., Житинская О.М., Фоменко И.К. Оптимизация системы мониторинга природно-технической системы «Железорудные месторождения» на базе анализа временных рядов // Материалы Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)» г. Москва, МГИ-РГГРУ, 4–6 апреля 2018. Т. 2. М.: НПП «Филтроткани», 2018. С. 220–221.
13. Bar N., Heweston A. Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses // 20th International Conference on Geological, Geotechnical and Environmental Engineering «ICGGEE 2018». Melbourne, Australia. 2018. Vol. 12 (2). P. 66–72.
14. Bar N., Weekes G., Welideniya S. Benefits and limitations of applying directional shear strengths in 2D and 3D limit equilibrium models to predict slope stability in highly anisotropic rock masses. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Neil_Bar/research. (Дата обращения 06.08.2018).
15. Barton N.R., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice // Rock Mech. 1977. Vol. 10 (1–2). P. 1–54.
16. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Geotechnique. 1955. N. 5. P. 7–17.
17. Duncan J.M. Finite element analyses of slopes and excavations. State-of-the-Art Report // Proceedings of the First Brazilian Seminar on the Application of the Finite Element Method in Soil Mechanics. COPPE. Rio de Janeiro, Brazil. 1974. P. 195–208.
18. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons, Inc. 2005. 309 p.
19. Esterhuizen J., Filz G.M., Duncan J.M. Constitutive Behaviour of Geosynthetic Interfaces // Journal of GeoTechnical and Geoenvironmental Engineering. October 2001. P. 834–840.
20. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition // Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC'2002). Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. N. 1. P. 267–273.
21. Hoek E., Bray J.W. Rock Slope Engineering/3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p.
22. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis // In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, Sweden. 1954. P. 43–49.
23. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surface // Geotechnique. 1965. N.15. P. 79–93.
24. Rui Wang, Xi Wang, Kun Yin, Yang Zhao. Landslide Stability Analysis Based on GeoStudio // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 634–638. P. 3701–3704.

REFERENCES

1. Zheleznye rudy KMA: monografiya / pod red. V.P. Orlova, I.A. Shevyreva, N.A. Sokolova [Iron ores of KMA]. M., ZAO «Geoinformmark» Publ., 2001. 616 p. (In Russian).
2. Zhitinskaya O.M., Yarg L.A. Izmeneniye komponentov prirodnoy sredy pri dlitel'noy razrabotke mestorozhdeniy otkrytym sposobom (na primere KMA) [Changes in the components of the natural environment in the long-term development of deposits by the open method (for example, KMA)]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Nauchno-metodicheskiy zhurnal. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2018, no. 1, pp. 49–61. (In Russian)
3. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Otsenka vliyaniya anizotropii svoystv gruntov na ustoychivost' sklonov [Evaluation of the influence of anisotropy of soil properties on slope stability]. Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Surveys], 2013, no. 9, pp. 44–50. (In Russian)
4. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Opolzni v skal'nykh gruntakh i otsenka ikh ustoychivosti [Landslides in rocky soils and an estimation of their stability]. Inzhenernaya geologiya [Engineering geology], 2016, no. 4, pp. 4–21. (In Russian)
5. Crouch S., Starfield A. Methods of boundary elements in the mechanics of a rigid body. (Russ. ed.: Krauch S., Starfield A., translation from English: Tleuzhanova M. A., Lin'kova A. M. Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela. Moscow, Mir, Publ., 1987, 328 p.).
6. Opredeleniye optimal'nykh parametrov bortov kar'yera i otvalov ОАО «Stoylenskiy GOK» pri razvitiy gornyykh rabot s uvelicheniyem dobychi syroy rudy do 42 mln. tonn v god [Determination of optimal parameters of the sides of the quarry and dumps of JSC «Stoilensky GOK» in the development of mining operations with an increase in the extraction of crude ore to 42 million tons per year]. Belgorod, 2007. 55 p. (In Russian, unpublished)
7. Pendin V.V., Fomenko I.K. Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti [Methodology of landslide hazard assessment and forecast]. Moscow, Publishing House of the Russian Federation Lenand, 2015, 320 p. (In Russian).
8. Pravila obespecheniya ustoychivosti otkosov na ugol'nykh razrezakh [Rules for ensuring the stability of slopes on coal mines]. SPb., VNIMI Publ., 1998, 208 p. (In Russian)
9. Pustovoytova T.K., Kagermazova C.B. Inzhenerno-geologicheskoye obespecheniye prognoza ustoychivosti bortov kar'yero v [Engineering and geological support for the forecast of stability of the sides of quarries] Marksheyderskoye delo v sotsialisticheskikh stranakh [Mine surveying in the socialist countries] T. 2, L., VNIMI Publ., 1988, pp. 250–256. (In Russian)
10. Fomenko I.K. Matematicheskoye modelirovaniye napryazhennogo sostoyaniya inzhenerno-geologicheskogo massiva, slozhennogo anizotropnymi gornymi porodami. Dis. kand. geol.-min. nauk [Mathematical modeling of the stressed state of the engineering-geological massif, composed of anisotropic rocks]. Dis. kand. geol. min. sciences. Moscow, 2001, 138 p. (In Russian)
11. Fomenko I.K., Pendin V.V., Gorobtsov D.N. Otsenka ustoychivosti bortov kar'yero v skal'nykh gruntakh [Estimation of the stability of quarries in rocky soils]. Gornyye nauki i tekhnologii [Mining sciences and technologies], 2016, no. 3, pp. 10–21. (In Russian)
12. Yarg L.A., Zhitinskaya O.M., Fomenko I.K. Optimizatsiya sistemy monitoringa prirodno-tekhnicheskoy sistemy «Zhelezorudnyye mestorozhdeniya» na baze analiza vremennykh ryadov [Optimization of the monitoring system of the natural-technical system «iron ore deposits» on the basis of the analysis of time series]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Strategiya razvitiya geologicheskogo issledovaniya neдр: nastoyashcheye i budushcheye» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Strategy for the Development of Geological Exploration of the Earth: present and future» (on the occasion of the 100th anniversary of MGRI-RGGRU)]. M., Fil'trotkani Publ., 2018, T. 2, pp. 220–221. (In Russian)
13. Bar N., Heweston A., Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses. Conference: ICGGEE 2018: 20th International Conference on Geological,

- Geotechnical and Environmental Engineering At, Melbourne, Australia, 2018, vol. 12(2), pp. 66–72.
14. Bar N., Weekes G., Welideniya S. *Benefits and limitations of applying directional shear strengths in 2D and 3D limit equilibrium models to predict slope stability in highly anisotropic rock masses*. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Neil_Bar/research. (accessed 06.08. 2018).
 15. Barton, N.R. and Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*, 1977, vol. 10 (1–2), pp. 1–54.
 16. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 1955, no. 5, pp. 7–17.
 17. Duncan. J.M. Finite element analyses of slopes and excavations, State-of-the-Art Report, *Proceedings of the First Brazilian Seminar on the Application of the Finite Element Method in Soil Mechanics*, COPPE, Rio de Janeiro, Brazil, 1974. pp. 195–208.
 18. Duncan J.M., Wright S.G. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc., 2005, 309 p.
 19. Esterhuizen, J., Filz, G.M. and Duncan, J.M. Constitutive Behaviour of Geosynthetic Interfaces. *Journal of GeoTechnical and Geoenvironmental Engineering*, October 2001, pp. 834–840.
 20. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC'2002)*, Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002, no. 1, pp. 267–273.
 21. Hoek E., Bray J.W. *Rock Slope Engineering/3rd ed.* London, Institution of Mining and Metallurgy, 1981, 358 p.
 22. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*. Stockholm, Sweden, 1954, pp. 43–49.
 23. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*, 1965, no. 15, pp. 79–93.
 24. Rui Wang, Xi Wang, Kun Yin, Yang Zhao. Landslide Stability Analysis Based on GeoStudio, *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 634–638, pp. 3701–3704.
-